第46卷 第11期
2023年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 11
Nov. 2023

乌鲁木齐市核心城区绿地土壤重金属累积特征及生态风险

梁 樑[1]， 郭晓淞[1]， 陈汉杰[1]， 徐皓帆[1]， 周衍波[1]，
谢邵文[1,2,3]， 杨 芬[4]， 韦朝阳[4]

（1. 佛山科学技术学院，广东 佛山 528000；2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室，广东 广州 510642；3. 广东省科学院生态环境与土壤研究所/华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心/广东省农业环境综合治理重点实验室，广东 广州 510650；4. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地表层格局与模拟重点实验室，北京 100101）

摘 要： 随着城市扩张和工业化进程的加快，我国大型城市核心城区土壤已遭受不同程度的重金属污染。以乌鲁木齐市核心城区典型城市公园绿地和交通枢纽绿地为对象，系统探究土壤中6种重金属（Cd、Cr、Cu、Pb、Zn和Ni）的累积特征和生态风险。结果表明：（1）交通枢纽绿地土壤重金属含量均高于城市公园绿地土壤。相较于乌鲁木齐市土壤背景值，城市公园绿地土壤重金属为轻度污染，而交通枢纽绿地土壤重金属为中度污染。（2）不同行政区城市公园绿地土壤重金属综合污染指数为：头屯河区（2.85）>水磨沟区（2.13）>天山区（1.91）>新市区（1.85）>米东区（1.23），而交通枢纽绿地土壤重金属综合污染指数为：米东区（4.17）>沙依巴克区（3.24）>新市区（2.84）>水磨沟区（2.70）>头屯河区（2.50）>天山区（2.37）。（3）不同行政区城市公园绿地土壤重金属的潜在生态风险指数为：水磨沟区（101.68）>头屯河区（98.83）>新市区（88.56）>天山区（73.43）>米东区（58.24），而交通枢纽绿地土壤重金属的潜在生态风险指数为：米东区（177.60）>水磨沟区（131.75）>沙依巴克区（120.25）>新市区（105.76）>头屯河区（105.63）>天山区（82.12）。城市公园绿地土壤综合污染指数和潜在生态风险指数最大的分别为头屯河区和水磨沟区，而城市交通枢纽绿地土壤的综合污染指数和潜在生态风险指数最大的均是米东区。（4）在空间分布特征上，城市公园绿地土壤高值区总体上以岛状分布在中心城区，而交通枢纽绿地土壤除Ni外，高值区以岛状分布在米东区的西南部和沙依巴克区的东部。工业企业的显著集聚、密集的交通干线和较高的人口密度成为影响不同行政区内土壤重金属污染程度差异的主要因素。

关 键 词： 土壤重金属；城市公园；交通枢纽；环境风险；乌鲁木齐市

文章编号： 1000－6060(2023)11－1868－11(1868～1878)

随着城市扩张和工业化进程的加快，目前我国大型城市核心城区及其周边交通枢纽土壤已遭受不同程度的重金属污染[1]。核心城区是人口密集、工业企业生产集聚和交通拥堵区域，相较于农田和森林土壤，核心城区绿地土壤在时间和空间维度上更容易受到人为活动的影响。根据中国城市统计年鉴数据显示[2]，从2010年到2020年，乌鲁木齐市建成区面积从343 km^{2}扩大到521.60 km^2，常住人口

收稿日期： 2023-02-15； **修订日期：** 2023-07-21

基金项目： 广东省基础与应用基础研究基金粤佛联合基金项目(2022A1515110930，2022A1515110718)；岭南现代农业科学与技术广东省实验室科研项目(NZ2021026)；第三次新疆综合科学考察天山北坡土地开发调查与生态环境效应评估项目(2022xjkk0902)；佛山市生态固碳工程技术研究中心项目资助

作者简介： 梁樑(1997-)，男，本科在读，主要从事土壤重金属环境风险评价研究. E-mail: liangliang18y@163.com

通讯作者： 谢邵文(1990-)，男，博士，讲师，主要从事流域面源污染控制和重金属环境风险评价研究. E-mail: xiesw09@163.com

从311×10^4^人增加到405×10^4^人，民用车辆保有量也从30×10^4^辆增至128.98×10^4^辆。人口集聚产生的生活垃圾、化石燃料消耗、机动车和工业“三废”排放以及污水灌溉等污染源，会引起重金属元素通过地表、地下径流和大气沉降等方式进入到城区土壤，引发相应的土壤重金属累积甚至污染问题。城市公园绿地既是人们休闲活动场所，又发挥着局部生态系统的调节作用，而交通枢纽绿地既承载着人们出行的中转站和衔接点，又起到城市生态环境的美化作用。因此，研究城市不同类型绿地土壤重金属累积特征及生态风险，对于打造生态城市和健康的人居环境均有重要的现实意义。

目前，已有不少学者对城市不同类型绿地土壤重金属累积现状展开研究。如有研究表明，上海市中心城区绿地土壤中重金属主要源于交通排放和工业活动释放，道路绿地土壤重金属更易受交通排放的影响[3]；湖北省主要城市中心城区绿地土壤中重金属含量分析结果显示，城市绿地土壤来源复杂，受人类生产活动影响较大，应当加强城市绿地土壤重金属污染防控[4]；邸东柳等[5]对保定市主城区不同类型绿地土壤重金属潜在生态风险研究发现，道路绿地综合污染程度最高，达到重度污染，除三环学校绿地为轻微风险外，均为中度风险。因此，不同城市主城区不同类型绿地土壤重金属污染程度具有一定差异性。乌鲁木齐市位于欧亚大陆腹地，是我国西北地区重要的中心城市和面向中亚、西亚的国际商贸中心[6]，但对于乌鲁木齐市核心城区绿地土壤重金属污染状况和生态风险的研究相对较少。因此，本研究以乌鲁木齐市核心城区为对象，系统研究其核心城区不同类型绿地土壤重金属污染状况，并对其累积特征及生态风险进行分析，旨在为乌鲁木齐市生态环境保护和城市区域土壤生态环境质量管理提供理论支撑，对构建城市与自然生态和谐发展有一定参考价值。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

乌鲁木齐市地处天山中段北麓、准噶尔盆地南缘，是新疆维吾尔自治区首府。截至2022年，乌鲁木齐市常住人口408.24×10^4^人，常住人口城镇率96.50%，全市建成区面积545.10 km^2^，城市公园绿地面积达338 km^2^。本文研究区为乌鲁木齐市核心城区（87°23′00″~87°48′10″E，43°40′30″~44°01′40″N），总面积为1100 km^2^，即绕城高速范围内的天山区、沙依巴克区、新市区、水磨沟区、头屯河区和米东区。

1.2　样品采集与分析

采用随机布点法在城市居民活动影响较大的典型城市公园绿地和交通枢纽绿地进行表层土壤（0~20 cm）样品采集，共采集20个城市公园绿地和20个交通枢纽绿化隔离带内土壤样品（图1）。在每个城市公园绿地和交通枢纽绿地内按照梅花均匀采样法，每块绿地均采集3个样品，并用四分法最终混合组成1个土壤样品进行后续测试分析。采样时去除土壤表层的腐殖质、植被根系、大块石头等杂质，放置样品袋内并标注采样地点、编号、经纬度、采样日期等信息后密封保存。

土壤样品经自然风干，剔除杂物，用玛瑙研钵研磨成粉末，过100目尼龙网筛后备用。土壤样品完成前处理后采用HNO_3-HCl-H_2O_2法进行消解，采用电感耦合等离子体质谱仪（ICP-MS，安捷伦7700）对镉（Cd）、铬（Cr）、铜（Cu）、铅（Pb）、锌（Zn）和镍（Ni）6种重金属含量进行测定。运用SPSS软件对数据进行统计分析，使用ArcGIS 10.8进行绘图，并采用反距离插值法[7]对土壤重金属的空间分布特征进行分析。

1.3　评价方法

1.3.1　单因子指数法　单因子指数法是进行土壤重金属污染评价普遍采用的方法，计算公式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中：P_i为土壤中重金属i的单因子指数；C_i为土壤中重金属i的含量（mg·kg^-1^）；S_i为土壤重金属i的背景值[8]（mg·kg^-1^）。本研究采用乌鲁木齐市土壤背景值（表1）作为土壤重金属的参考标准。P_i值越大，表示污染越严重，$P_i \le 1$为未污染，$1< P_i \le 2$为轻污染，$2< P_i \le 3$为中污染，$P_i >3$为重污染。

1.3.2　综合污染指数法　综合污染指数法（即内梅罗指数法）是进行多项土壤重金属污染评价的综合方法，计算公式为：

$$P = \sqrt{\frac{[\mathrm{avg}(P_i)]^2 + [\max(P_i)]^2}{2}} \tag{2}$$

式中：P为综合污染指数，$P \le 0.7$表示清洁，$0.7<P\le$

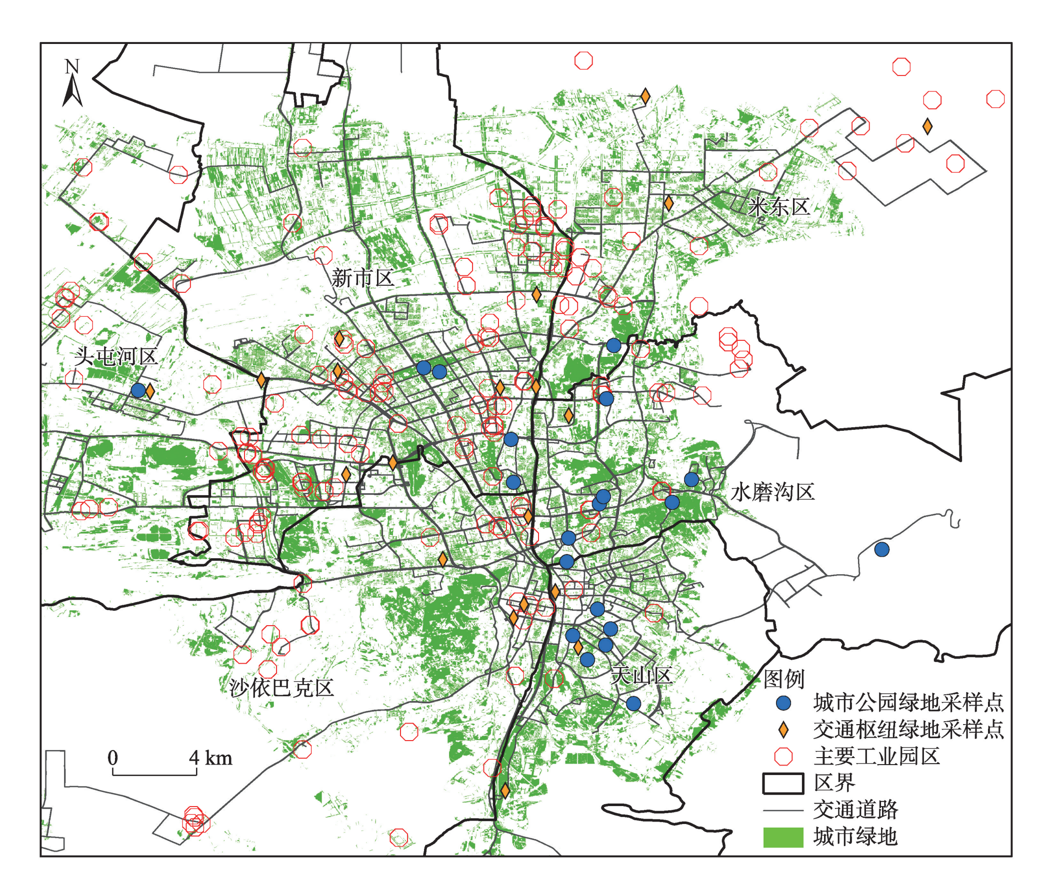


图1 研究区域采样点分布

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points in the study area

表1 乌鲁木齐市土壤重金属背景值

Tab. 1 Soil background values of heavy metals in Urumqi City /mg·kg⁻¹

重金属元素	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
背景值	0.12	49.30	26.70	19.40	68.80	26.60

1.0表示尚清洁，$1.0<P\le2.0$ 表示轻度污染，$2.0<P\le3.0$ 表示中度污染，$P>3.0$ 表示重度污染；P_i 为土壤中重金属的单因子指数；$\mathrm{avg}(P_i)$ 为土壤中各重金属单因子指数的平均值；$\max(P_i)$ 为土壤中各重金属单因子指数的最大值。

1.3.3 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法是瑞典学者Hakanson[9]于1980年建立，现已被普遍运用于土壤重金属的生态风险评价，计算公式为：

$$\mathrm{RI}=\sum_{i=1}^{n}E_{\mathrm{r}}^{i}=\sum_{i=1}^{n}T_{\mathrm{r}}^{i}\times P_{\mathrm{r}}^{i} \tag{3}$$

式中：RI为潜在生态风险指数；E_{r}^{i} 为土壤中重金属 i 的潜在生态风险指数；T_{r}^{i} 为土壤中重金属 i 的相应毒性系数，各金属的毒性系数Cd为30，Cu、Ni和Pb均为5，Cr为2，Zn为1[10]；P_{r}^{i} 为土壤中重金属 i 的单因子指数。潜在生态风险指数的评级标准为：$\mathrm{RI}<150$ 为轻微生态风险，$150\le\mathrm{RI}<300$ 为中等生态风险，$300\le\mathrm{RI}<600$ 为强生态风险，$\mathrm{RI}\ge600$ 为很强生态风险。

2 结果与分析

2.1 乌鲁木齐市核心城区绿地土壤重金属累积特征

乌鲁木齐市核心城区不同类型绿地土壤中6种重金属元素的分析结果如表2所示。通过与乌鲁木齐市区域土壤背景值比对分析可知，城市公园绿地土壤重金属的平均含量均超过了背景值。除Ni含量与背景值含量相接近外，Cr和Cu含量高出背景值近1.5倍，而Cd、Pb和Zn含量高出背景值近2倍。交通枢纽绿地土壤除Ni含量与背景值含量相接近

表2　乌鲁木齐市核心城区不同类型绿地土壤重金属含量

Tab. 2　Content of heavy metals in different types of green land soils in core urban area of Urumqi City

绿地类型	统计值	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni
城市公园绿地	平均值/mg·kg^{-1}	0.24	78.30	35.05	37.92	128.46	31.01
	标准差/mg·kg^{-1}	0.09	9.14	10.00	13.02	43.85	9.00
	最大值/mg·kg^{-1}	0.43	95.45	61.30	72.97	258.17	47.20
	最小值/mg·kg^{-1}	0.09	54.51	23.40	20.35	76.73	13.90
	单因子污染指数	2.00	1.59	1.31	1.95	1.87	1.17
交通枢纽绿地	平均值/mg·kg^{-1}	0.31	90.23	56.62	68.91	155.37	34.20
	标准差/mg·kg^{-1}	0.14	32.87	18.20	27.00	76.90	12.60
	最大值/mg·kg^{-1}	0.77	197.74	93.90	146.46	420.70	66.90
	最小值/mg·kg^{-1}	0.15	66.49	29.00	37.74	94.89	18.30
	单因子污染指数	2.58	1.83	2.12	3.55	2.26	1.45

外，Cr、Cu和Zn含量高出背景值近2倍，Cd含量高出背景值近2.5倍，而Pb含量高出背景值超3.5倍，表明研究区交通枢纽绿地土壤已表现出较强的Pb和Cd富集特征。

从单因子污染指数可以看出，乌鲁木齐市城市公园绿地土壤中各重金属单因子污染指数依次为Cd(2.00)>Pb(1.95)>Zn(1.87)>Cr(1.59)>Cu(1.31)>Ni(1.17)，Cd的累积程度最为严重，已属于轻度污染。朱立安等[11]曾对佛山市城市森林公园表层土壤重金属累积特征研究发现，佛山市大部分森林公园及林区土壤重金属含量均不同程度上超过了珠三角土壤重金属环境背景值，表明在城市化和工业化发展进程中，大型城市公园土壤重金属污染已普遍受到人为活动的影响。在过去10 a里，乌鲁木齐市城市公园绿地面积从20.63 km^{2}增加到38.55 km^2[2]，城市公园绿地土壤对重金属的承载量也显著增长。核心城区在城市发展过程中容易受到工业源和交通源的影响，引起城市公园绿地土壤重金属累积。乌鲁木齐市交通枢纽绿地土壤中各重金属单因子污染指数依次为Pb(3.55)>Cd(2.58)>Zn(2.26)>Cu(2.12)>Cr(1.83)>Ni(1.45)。Pb的累积程度最为严重，达到重污染，而Cd、Zn和Cu为中度污染。孙雪菲等[12]曾对典型石化工业城市土壤重金属来源及空间分布进行研究，结果也表明Cd、Pb和Zn受到交通运输的影响明显，多条公路干线的贯穿、繁忙的运输都是造成这3种元素含量较高的主要原因。过去10 a，乌鲁木齐市城市道路面积从20.05 km^{2}扩张到70.13 km^2[2]、民用车辆保有量的激增、车辆轮胎在道路上的磨损、尾气排放和风沙打磨车辆的外漆等多重因素叠加，成为核心城区交通枢纽绿地的土壤重金属的重要输入源。

在生态风险方面，城市公园绿地土壤重金属的潜在生态风险强弱依次为Cd(60)>Pb(9.75)>Cu(6.55)>Ni(5.85)>Cr(3.18)>Zn(1.87)，Cd的潜在生态风险指数达中等生态风险，其他重金属潜在生态风险均低于10，属轻微生态风险。而交通枢纽绿地土壤各重金属潜在生态风险强弱依次为Cd(77.40)>Pb(17.75)>Cu(10.60)>Ni(7.25)>Cr(3.66)>Zn(2.26)，Cd的潜在生态风险指数达到77.40，即将超过中等生态风险临界值，需引起重视。可以看到，Cd在不同类型绿地中均属于中等生态风险，表明Cd元素为乌鲁木齐市研究区绿地土壤中最主要的生态风险元素。

为了进一步明确乌鲁木齐市和国内其他大型城市土壤重金属污染状况的差异性，对各城市重金属单因子污染指数、综合污染指数和潜在生态风险指数进行了对比研究(表3)。结果表明，乌鲁木齐市城市公园绿地6种重金属的单因子污染指数均高于上海市、武汉市和重庆市。北京市、广州市、西安市和天津市城市公园绿地中Cd的单因子污染指数均高于乌鲁木齐市(2.00)，与乌鲁木齐市相比，这些城市的城市化和工业化开始时间更早，城市公园绿地Cd污染问题也更为严重。广州市城市公园Cd(9.59)达到重污染程度，其来源与城市工业展布格局、城市交通排放和人口密度有密切相关[16]。同时，北京市城区部分新建公园是由工业或农业用地演变而来，城市化时间、公园存续时间和曾经的工农业活动成为影响其城市土壤重金属积累的重要

表3 乌鲁木齐市与国内其他大型城市不同类型绿地土壤重金属污染状况

Tab. 3 Soil heavy metal pollution of different types of green land in Urumqi and other large cities in China

绿地类型	城市	单因子污染指数						综合污染指数	潜在生态风险指数
		Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni		
城市公园绿地	乌鲁木齐市	2.00	1.59	1.31	1.95	1.87	1.17	1.83	87.20
	北京市[13-14]	6.62	0.93	1.50	1.43	1.42	0.56	5.12	219.33
	上海市[15]	1.56	0.80	1.03	1.04	1.21	0.83	1.34	64.11
	广州市[16]	9.59	1.16	2.21	1.80	2.77	1.27	7.13	319.20
	武汉市[17]	0.45	0.38	0.44	0.15	-	-	-	-
	兰州市[18]	-	1.00	1.58	1.40	-	1.44	-	-
	西安市[19]	2.22	1.52	2.77	3.15	2.05	-	-	-
	天津市[20]	2.15	0.99	1.57	1.58	1.46	1.00	1.94	88.85
	重庆市[21]	1.22	0.75	0.91	1.26	0.94	0.69	1.56	53.34
交通枢纽绿地	乌鲁木齐市	2.58	1.83	2.12	3.55	2.26	1.45	3.00	118.92
	北京市[22]	10.76	-	1.41	1.34	1.39	-	-	-
	上海市[15]	2.85	0.74	1.25	1.64	1.60	0.73	2.27	108.48
	广州市[23]	-	1.24	1.83	4.46	2.92	1.09	-	-
	武汉市[17]	0.58	0.37	0.42	0.18	-	-	-	-
	兰州市[24]	-	0.84	1.56	1.93	1.64	1.03	-	-
	西安市[25]	-	1.01	1.35	1.59	1.55	0.97	-	-
	天津市[20]	3.80	0.97	1.43	1.50	1.46	0.94	2.94	136.66
	重庆市[26]	10.85	0.30	0.85	0.89	1.06	0.64	7.86	339.06

注:“-”表示无此值。

因素[13,27]。同时,城市土壤重金属累积差异与区域环境条件密切相关。区域之间的工业和交通运输差异[28],可能是导致乌鲁木齐市Cr的单因子污染指数高于其他城市的主要原因。在干旱地区,气候干燥、风速大的环境下,工业“三废”排放和冬季燃煤,容易引起沙尘的累积与起尘[29],通过大气沉降的方式给乌鲁木齐市等位于干旱区的城市公园土壤带来大量的重金属累积。

乌鲁木齐市核心城区交通枢纽绿地6种重金属的单因子污染指数均高于武汉市、兰州市和西安市。与乌鲁木齐市相比,北京市、上海市、天津市和重庆市作为超大城市,其城市交通枢纽绿地中Cd的单因子污染指数均高于乌鲁木齐市(2.58),其中北京市(10.76)和重庆市(10.85)达到重污染。重庆市作为历史悠久的工业城市,Cd的污染源包括冶炼、电镀、涂料、塑料稳定剂等工业排放[26],工业生产过程中排放的废水废物,可通过不同途径进入到城市土壤中[30]。特别值得注意的是,乌鲁木齐市和广州市Pb的单因子污染指数高达3.55和4.46,已经达到重污染程度。重金属Pb主要来源于在快速的城市化和繁忙的交通活动下,含铅汽油的使用以及车轮胎磨损[31]。彭驰等[32]研究也表明土壤Pb含量沿海城市普遍高于内陆城市,经济发达城市一般高于经济欠发达城市。

2.2 乌鲁木齐市核心城区土壤重金属空间分布特征

2.2.1 乌鲁木齐市核心城区不同类型绿地土壤重金属空间分布特征 乌鲁木齐市核心城区不同类型绿地重金属含量的空间插值结果如图2、图3所示。对核心城区城市公园绿地而言,Cd主要以岛状分布在中心城区,而外围城区的含量较低。中心城区集聚主要工业园,工业企业产生大量含有Cd的“工业三废”,同时该地区交通道路密集,多个干线交汇在此。Cu和Zn的高值区呈岛状分布在水磨沟区的西南和天山区的西北交界处,Zn在头屯河区的东部也出现富集特征,主要与该区域工业产业结构类型有关。Cu和Zn广泛应用于汽车、电子、机械、化工等多行业的生产过程,是特定行业的主要特征重金属[33]。根据新疆统计年鉴数据显示,头屯河区规模以上工业排名前列的行业包含黑色金属冶炼、压延加工、电气机械和器材制造和汽车制造业,因此相当数量的Cu、Zn通过工业生产产生的废气、废水、废渣输入周边土壤环境。Pb主要富集在水磨沟区的西南和

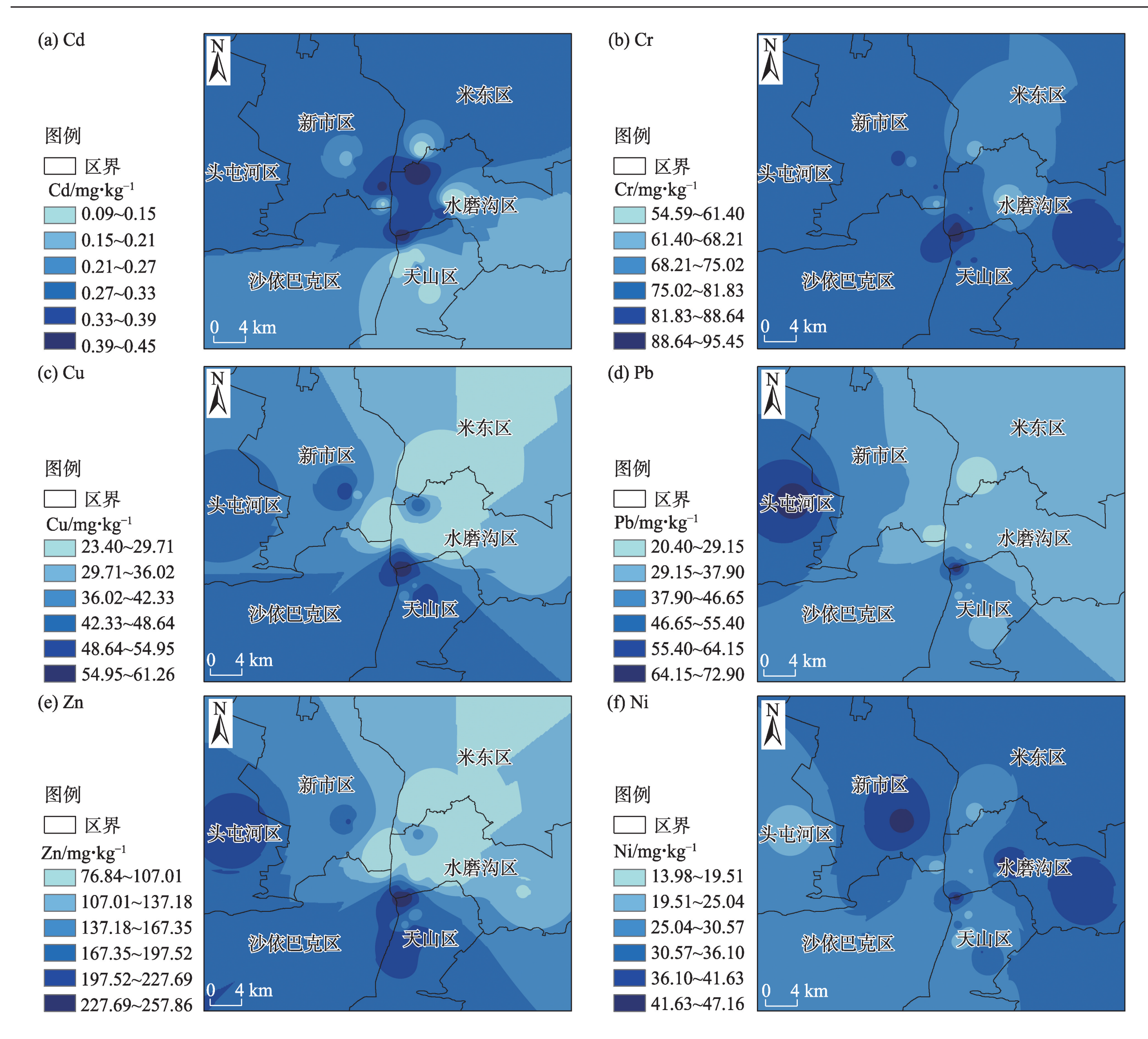


图2　乌鲁木齐市核心城区城市公园绿地土壤重金属含量空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of heavy metal content in soil of park green land in the core urban area of Urumqi City

天山区的西北交界处以及头屯河区的东部，与Zn的空间布局具有相似性，表明其可能存在相似的污染源。于瑞莲等[31]研究也表明Pb来源于含铅汽油的使用以及车轮胎磨损，头屯河区北邻乌鲁木齐市国际机场，同时拥有新疆最大的列车编组站和货物储运站，乌(鲁木齐)昌(吉)大道、乌(鲁木齐)奎(屯)高速公路贯区而过。民航的起降以及交通道路机动车的行驶，以尾气排放方式沉降到周边绿地土壤。Cr的高值区集聚在中心城区南部和水磨沟区东部，水磨沟区主要矿产资源有煤炭、油页岩、黏土、陶粒页岩等，工业企业开采、加工矿产资源产生的污染物，最终通过降水、扬尘和污水排放方式在城市公园绿地富集。Ni的高值区零星出现在新市区的南部和水磨沟区，根据新疆统计年鉴数据显示，新市区规模以上工业企业达83个，工业品类众多，涵盖纱、塑料制品、钢材、天然原油、铝材等。同时，新市区作为近年来乌鲁木齐市重点发展区，人车流量激增也加速了该区重金属的累积。

交通枢纽绿地各重金属的高值区总体上均以岛状分布在米东区西南部和沙依巴克区东部。米东区规模以上工业企业有65个，能源消耗(48.81%)和颗粒物排放量(40.93%)占比均为全市第一[34]。沙依巴克区规模以上工业企业有16个，该区域主要工业产品产量来自电石、印刷品和商品混凝土行业，重点行业的排放导致重金属在此处表层土壤累积。Cu的高值区主要出现在新市区南部，Cu常被用于制作汽车刹车片，在交通密集的区域容易造成Cu污染[35]。Cr呈岛状分布，高值分布在米东区西南

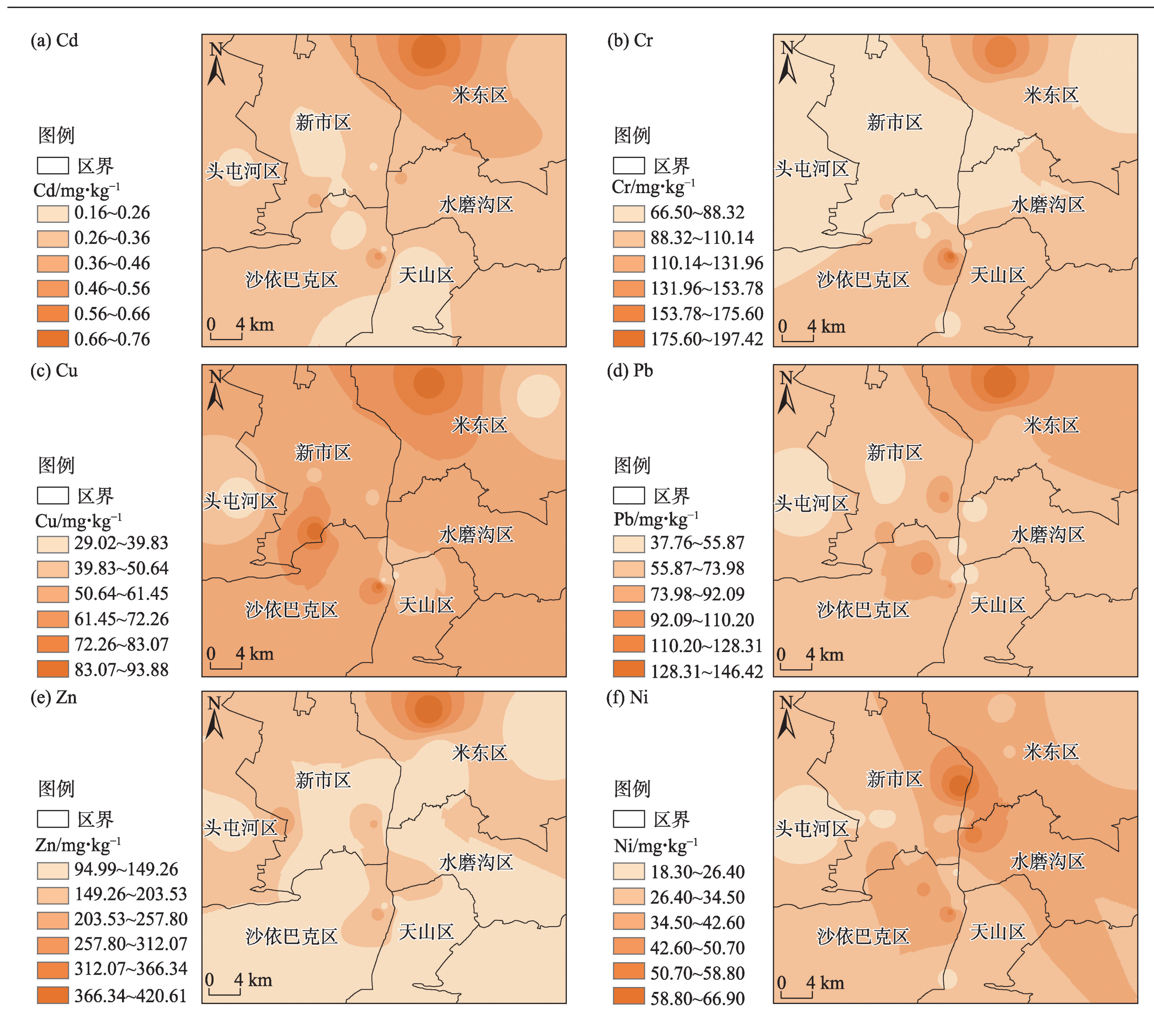


图3 乌鲁木齐市核心城区交通枢纽绿地土壤重金属含量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metal content in soil of transportation hub in the core urban area of Urumqi City

部和沙依巴克区东北部,地带性较为明显,南北两侧为高值区,中部为低浓度区域。Cd和Pb高值区以岛状大面积分布在米东区西南部,米东区工业企业也主要分布在其南部。该区拥有全市最大的商业服务用地,人口密集、车流量大、车辆轮胎和刹车片的机械磨损以及高强度的机动车尾气排放,导致交通枢纽绿地土壤Cd和Pb的显著累积。Ni高值区以岛状形式零星分布在中心城区,中心城区受到人为活动影响较大,输入来源更为多样化。

2.2.2 乌鲁木齐市各行政区不同类型绿地土壤重金属污染状况特征 乌鲁木齐市核心城区6个市辖区不同类型绿地土壤重金属的综合污染指数和潜在生态风险指数分布如图4所示。不同行政区城市公园绿地土壤重金属综合污染指数为:头屯河区(2.85)>水磨沟区(2.13)>天山区(1.91)>新市区(1.85)>米东区(1.23)。头屯河区和水磨沟区的综合污染指数的评价结果为中度污染,其余行政区均为轻度污染。潜在生态风险指数方面:水磨沟区(101.68)>头屯河区(98.83)>新市区(88.56)>天山区(73.43)>米东区(58.24)。各行政区评价结果均为轻微生态风险。与综合污染指数评价结果相似,水磨沟区、头屯河区的潜在生态风险指数均处于较高水平。

乌鲁木齐市核心城区不同行政区交通枢纽绿地土壤重金属综合污染指数为:米东区(4.17)>沙依巴克区(3.24)>新市区(2.84)>水磨沟区(2.70)>头屯河区(2.50)>天山区(2.37)。米东区、沙依巴克区综合污染指数评价结果为重度污染,其余行政区为中

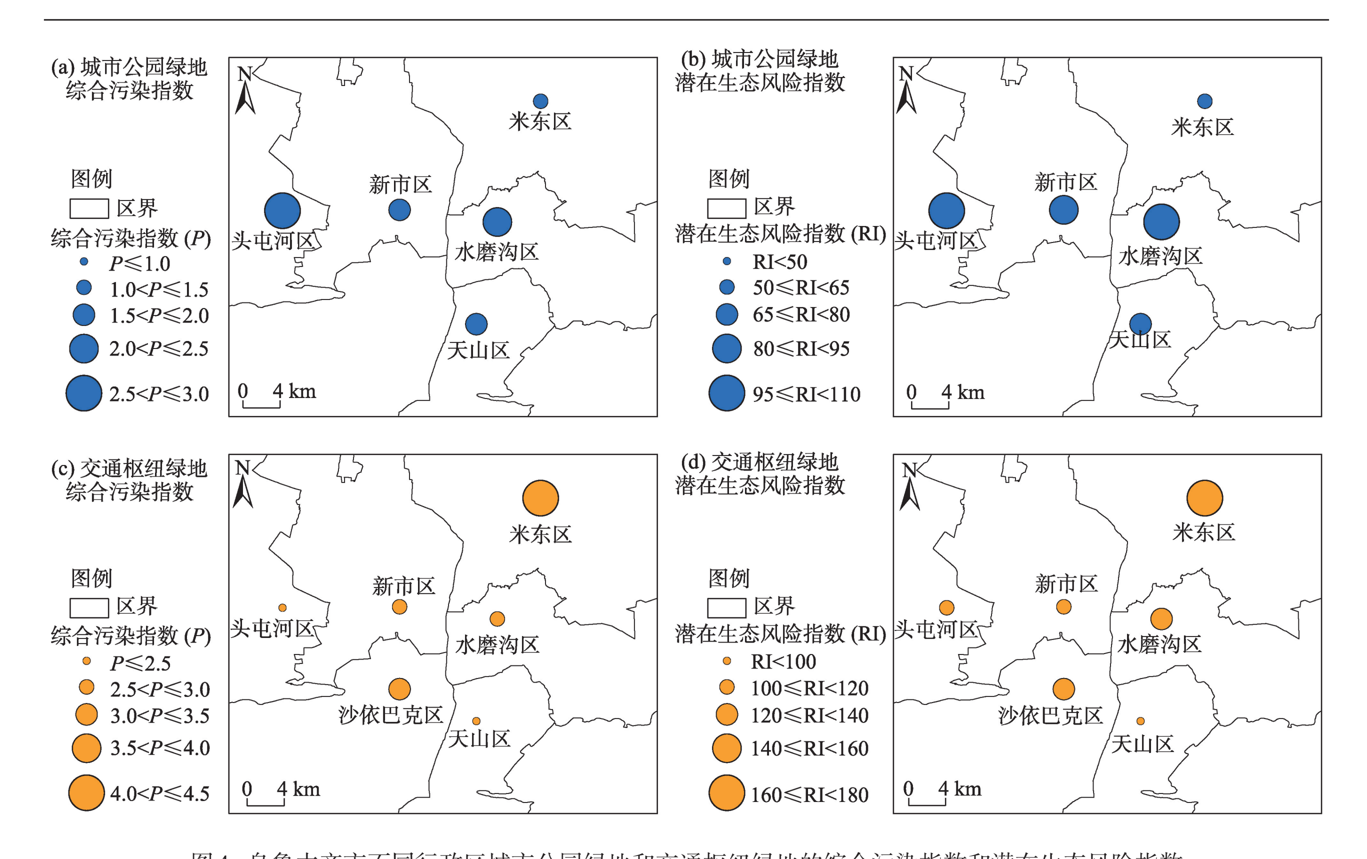


图4　乌鲁木齐市不同行政区城市公园绿地和交通枢纽绿地的综合污染指数和潜在生态风险指数

Fig. 4　Comprehensive pollution index and potential ecological risk index of urban park green land and transportation hub green land in different administrative regions of Urumqi City

度污染。潜在生态风险指数方面：米东区(177.60)>水磨沟区(131.75)>沙依巴克区(120.25)>新市区(105.76)>头屯河区(105.63)>天山区(82.12)。除了米东区的潜在生态风险指数评价结果为中等生态风险，其余行政区均为轻微生态风险。与综合污染指数评价结果相似，米东区潜在生态风险指数处于所有行政区最高水平，达到177.60。根据乌鲁木齐市统计年鉴显示，能源消耗和颗粒物排放量最大的区即为米东区，其占比分别为48.81%和40.93%[34]。近年来米东区建设扩张速度最快，年均扩张增幅达7.23%，工业园区大力建设，逐步成为城市重工业基地[36]，并且米东区还拥有全市最大的商业服务用地，建成区的高速扩张和高强度的工业活动是米东区土壤重金属的重要输入来源。谢邵文等[16]研究也表明核心城区中经济越发达的区域，工业企业越容易聚集，交通网线越稠密，人类活动越频繁，越会导致重金属的不断输入和累积。

乌鲁木齐市作为我国传统工业基地，其工业用地主要分布在头屯河区、水磨沟区的西北部、新市区的西南部和北部、米东区的南部以及沙依巴克区的东部，这些区域内的绿地土壤均受到工业生产排放的较大影响。新市区的西南部是机场设施用地、沙依巴克区的北部和东部是交通场站用地，这些区域内交通干线密集，绿地土壤受到交通运输的降尘影响较大。而新市区的南部、沙依巴克区的东北部、天山区的西北部、水磨沟区的西南部是居住用地和商务办公及商业服务用地，这些区域的经济相对发达、人口密集，绿地土壤受到人类活动影响更为频繁。在经济发达的工业集聚区域，密集的交通干线、频繁的人类活动，均会增加核心城区绿地土壤重金属的生态风险水平。

3　结 论

(1) 乌鲁木齐市核心城区不同类型绿地土壤中各重金属平均含量排序具有相似性，依次为：Zn>Cr>Pb>Cu>Ni>Cd，交通枢纽绿地土壤重金属含量均高于城市公园绿地土壤，表明交通枢纽绿地受到人为输入影响更为严重。

(2) 相较于乌鲁木齐市土壤背景值，核心城区城市公园绿地土壤的主要重金属污染因子为Cd>

Pb>Zn;交通枢纽绿地土壤的主要重金属污染因子为Pb>Cd>Zn,其中Pb达到重污染。不同类型绿地土壤重金属风险均为轻微生态风险,其中Cd在不同类型绿地中均为中等生态风险,表明Cd元素为研究区绿地土壤中最主要的生态风险元素。

(3)不同行政区城市公园绿地土壤重金属综合污染指数和潜在生态风险指数最大值分别出现在头屯河区和水磨沟区,该区域土壤受工业污染源影响较大。不同行政区交通枢纽绿地土壤重金属的综合污染指数和潜在生态风险指数最大值均出现在米东区,建成区扩张、高强度的工业活动和交通污染可能是该区域土壤重金属的主要来源。

(4)在空间分布特征上,城市公园绿地土壤重金属高值区总体上以岛状分布在中心城区;而交通枢纽绿地土壤除Ni外,高值区以岛状分布在米东区西南部和沙依巴克区东部。不同用地类型成为影响不同行政区内土壤重金属污染程度的重要因素。在经济发达、工业集聚区域,密集的交通干线、频繁的人类活动,均会增加核心城区土壤重金属的生态风险水平,这在今后城市土壤生态环境保护过程中应当引起重视。

参考文献(References)

[1] Xie S W, Yang F, Feng H X, et al. Assessment of potential heavy metal contamination in the peri-urban agricultural soils of 31 provincial capital cities in China[J]. Environmental Management, 2019, 64(3): 366-380.

[2] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2022. [Department of Urban Surveys, National Bureau of Statistics of China. China city statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011—2022.]

[3] 滕吉艳. 上海城市中心区不同类型绿地土壤重金属污染特征[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 927-933. [Teng Jiyan. Contamination characteristics of heavy metals in soils from urban green space in central Shanghai[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 927-933.]

[4] 余开升, 柯鹏振, 刘彬, 等. 湖北省中心城区典型绿地土壤污染特征及风险评价[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(增刊1): 210-215. [Yu Kaisheng, Ke Pengzhen, Liu Bin, et al. Pollution characteristics and risk assessment of typical green space soils in central urban area of Hubei Province[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 46(Suppl. 1): 210-215.]

[5] 邸东柳, 牛小云, 王绍坤, 等. 保定市主城区不同类型绿地土壤化学性质及重金属污染[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(6): 88-95, 110. [Di Dongliu, Niu Xiaoyun, Wang Shaokun, et al. Soil chemical properties and heavy metal contamination in different green space types of main urban area, Baoding City[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(6): 88-95, 110.]

[6] 排日海·合力力, 昝梅, 阿里木江·卡斯木. 乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1484-1496. [Helili Pariha, Zan Mei, Kasim Alimjan. Remote sensing evaluation of ecological environment in Urumqi City and analysis of driving factors[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1484-1496.]

[7] 吴亚坤, 刘广明, 杨劲松, 等. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100-106, 296. [Wu Yakun, Liu Guangming, Yang Jinsong, et al. Interpreting method of regional soil salinity 3D distribution based on inverse distance weighting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 100-106, 296.]

[8] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. [Chinese General Station of Environmental Monitoring. Soil chemical element background data of China[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.]

[9] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.

[10] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008(2): 112-115. [Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008(2): 112-115.]

[11] 朱立安, 殷爱华, 林兰稳, 等. 佛山城市森林公园表层土壤重金属累积特征、影响因素及其评价[J]. 生态环境学报, 2021, 30(4): 849-856. [Zhu Li'an, Yin Aihua, Lin Lanwen, et al. Accumulation characteristics, influencing factors and evaluation of heavy metals in surface soil in urban forest park of Foshan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4): 849-856.]

[12] 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 等. 典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟[J].环境科学, 2021, 42(3): 1093-1104. [Sun Xuefei, Zhang Lixia, Dong Yulong, et al. Source apportionment and spatial distribution simulation of heavy metals in a typical petrochemical industrial city[J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1093-1104.]

[13] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 不同土地利用方式下北京城区土壤的重金属累积特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2285-2293. [Li Xiaoyan, Chen Tongbin, Lei Mei, et al. Accumulation of heavy metals in urban soils under different land uses in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(11): 2285-2293.]

[14] 刘玲玲, 安燕飞, 马瑾, 等. 基于UNMIX模型的北京城区公园土壤重金属源解析[J]. 环境科学研究, 2020, 33(12): 2856-2863. [Liu Lingling, An Yanfei, Ma Jin, et al. Source apportionment of soil heavy metals in Beijing urban park based on the UNMIX model[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(12): 2856-2863.]

[15] 张施阳. 基于GIS的上海市不同功能区土壤重金属污染评价及健康风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1226-1236. [Zhang Shiyang. Assessment of soil heavy metal pollution and health risk in different functional areas of Shanghai City based on

GIS[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1226-1236.]

[16] 谢邵文, 郭晓淞, 杨芬, 等. 广州市城市公园土壤重金属累积特征、形态分布及其生态风险[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2206-2215. [Xie Shaowen, Guo Xiaosong, Yang Fen, et al. Accumulation characteristics, geochemical fractions distribution and ecological risk of heavy metals in soils of urban parks in Guangzhou, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31 (11): 2206-2215.]

[17] 黄敏, 杨海舟, 余萃, 等. 武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 135-139. [Huang Min, Yang Haizhou, Yu Cui, et al. Accumulation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in soils of Wuhan City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 135-139.]

[18] 胡梦珺, 李春艳, 李娜娜, 等. 基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2457-2468. [Hu Mengjun, Li Chunyan, Li Nana, et al. Using the matter-element extension model to assess heavy metal pollution in topsoil-in parks in the main district park of Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2457-2468.]

[19] 贾锐鱼, 朱万勇, 李楠, 等. 西安市公园土壤及灰尘中重金属污染与生态风险评价[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 316-320. [Jia Ruiyu, Zhu Wanyong, Li Nan, et al. Heavy metal contents and ecological risk assessment of soils and dust in urban parks of Xi'an City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 316-320.]

[20] 侯佳渝, 杨耀栋, 程绪江. 天津市城区不同功能区绿地土壤重金属分布特征及来源研究[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1130-1134. [Hou Jiayu, Yang Yaodong, Cheng Xujiang. Distribution and sources of heavy metals in greenbelt soil in different functional zones of Tianjin City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1130-1134.]

[21] 杨杉, 汪军, 李洪刚, 等. 重庆市绿地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J]. 土壤通报, 2018, 49(4): 966-972. [Yang Shan, Wang Jun, Li Honggang, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in green space of Chongqing City [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(4): 966-972.]

[22] 晏星, 罗娜娜, 赵文吉, 等. 北京城区交通边缘带土壤重金属污染研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 175-180. [Yan Xing, Luo Nana, Zhao Wenji, et al. Heavy metal pollution evaluation and spatial influence range analysis for main roads within the fifth ring road of Beijing urban[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12): 175-180.]

[23] 卓文珊, 唐建锋, 管东生. 广州市城区土壤重金属空间分布特征及其污染评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(4): 47-51. [Zhuo Wenshan, Tang Jianfeng, Guan Dongsheng. The distributive character and pollution assessment of heavy metals in urban soil of Guangzhou[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2009, 48(4): 47-51.]

[24] 李春艳. 兰州市主城区不同功能区表土重金属污染特征及风险评价[D]. 兰州: 西北师范大学, 2021. [Li Chunyan. Pollution characteristics and risk assessment of topsoil heavy metals in different functional areas in the main urban area of Lanzhou[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2021.]

[25] 周燕. 西安市不同功能区土壤重金属与多环芳烃污染研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018. [Zhou Yan. Study on heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in soils of different functional areas in Xi'an, China[D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2018.]

[26] 汪嘉利, 李章平, 杨志敏, 等. 重庆市主城区土壤重金属的污染特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(5): 31-35, 112. [Wang Jiali, Li Zhangping, Yang Zhimin, et al. Specificity of heavy metal soils in core zone of Chongqing[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2012, 29(5): 31-35, 112.]

[27] Gu Y G, Gao Y P, Lin Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city, Guangzhou[J]. Applied Geochemistry, 2016, 67: 52-58.

[28] Du H M, Lu X W. Spatial distribution and source apportionment of heavy metal(loid)s in urban topsoil in Mianyang, southwest China[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 10407, doi: 10.1038/s41598-022-14695-9.

[29] Kauhaniemi M, Kukkonen J, Härkönen J, et al. Evaluation of a road dust suspension model for predicting the concentrations of PM_{10} in a street canyon[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (22): 3646-3654.

[30] 姚文文, 陈文德, 黄钟宣, 等. 重庆市主城区土壤重金属形态特征及风险评价[J]. 西南农业学报, 2021, 34(1): 159-164. [Yao Wenwen, Chen Wende, Huang Zhongxuan, et al. Speciation characteristics and risk assessment of heavy metals in soil in core zone of Chongqing[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(1): 159-164.]

[31] 于瑞莲, 胡恭任, 袁星, 等. 大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 73-79. [Yu Ruilian, Hu Gongren, Yuan Xing, et al. Development in research on pollution source of heavy metals from atmospheric dust-recognition and analysis[J]. Earth and Environment, 2009, 37(1): 73-79.]

[32] 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 等. 中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 1-10. [Peng Chi, He Yalei, Guo Zhaohui, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in urban soils of major cities in China[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 1-10.]

[33] Chen T, Chang Q R, Liu J, et al. Identification of soil heavy metal sources and improvement in spatial mapping based on soil spectral information: A case study in northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 155-164.

[34] 蔺尾燕, 何静, 祝婕, 等. 米东工业园区大气污染物排放对乌鲁木齐市空气质量影响[J].新疆环境保护, 2022, 44(2): 9-15. [Lin Weiyan, He Jing, Zhu Jie, et al. Impact of airpollutant emissions in the Midong industrial park on air quality in Urumqi City[J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2022, 44(2): 9-15.]

[35] Somayeh S G, Mohsen G, Morteza G. Pollution, human health risk assessment and spatial distribution of toxic metals in urban soil of Yazd City, Iran[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(9): 1-16.

[36] 石天戈, 时卉. 基于地理探测器的乌鲁木齐城市扩张特征与时空驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 867-876. [Shi Tiange, Shi Hui. Urban expansion and its temporal and spatial driving forces of Urumqi based on geo-detector method[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 867-876.]

Accumulation characteristics and ecological risks of heavy metals in green land soils in core urban area of Urumqi City

LIANG Liang[1], GUO Xiaosong[1], CHEN Hanjie[1], XU Haofan[1], ZHOU Yanbo[1], XIE Shaowen[1,2,3], YANG Fen[4], WEI Chaoyang[4]

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China; 2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, Guangdong, China; 3. National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China/Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management/Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 4. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Owing to rapid urban expansion and industrialization in China, the core urban areas of large cities have suffered from varying degrees of heavy metal pollution in the soil. Herein, the accumulation characteristics and ecological risks of six heavy metals (Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, and Ni) in the soils of two distinct urban land types (urban park and transportation hub green lands) within the core urban areas of Urumqi City were systematically studied. The study yielded multiple key results: (1) Soil heavy metal concentrations in the green land soils of transportation hubs were higher than urban parks. Compared with the soil background values of heavy metals in Urumqi City, urban park green land of the core urban area exhibited light pollution, while the green land in transportation hubs demonstrated moderate pollution. (2) The comprehensive pollution index for soil heavy metals within urban park green land varied among different administrative regions, with Toutunhe District (2.85) showing the highest level, followed by Shuimogou District (2.13), Tianshan District (1.91), Xinshi District (1.85), and Midong District (1.23). Conversely, for green land in transportation hubs, the comprehensive pollution index of soil heavy metals differed across administrative regions, with Midong District (4.17) being the most heavily affected, followed by Sayibak District (3.24), Xinshi District (2.84), Shuimogou District (2.70), Tuotunhe District (2.50), and Tianshan District (2.37). (3) Regarding the potential ecological risk index for heavy metals in green soil of urban parks, the rankings among different administrative regions were as follows: Shuimogou District (101.68) >Toutunhe District (98.83) >Xinshi District (88.56) >Tianshan District (73.43) >Midong District (58.24). In addition, for transportation hubs green land, the potential ecological risk index of heavy metals for each administrative region exhibited regional disparities, with Midong District (177.60) being the most adversely affected, followed by Shuimogou District (131.75), Sayibak District (120.25), Xinshi District (105.76), Toutunhe District (105.63), and Tianshan District (82.12). The largest comprehensive pollution index and potential ecological risk index for urban park green land were observed in the Toutunhe and Shuimogou Districts, respectively, while the largest values for urban transportation hubs green land were documented in Midong District. (4) Spatial distribution characteristics revealed that high-value urban park green land was generally distributed in the central urban area, resembling islands of green amidst the urban landscape. Conversely, high-value heavy metal pollution of green land in transportation hubs was distributed in an island shape in the southwestern region of Midong District and the eastern part of Sayibak District, except for Ni. This study identifies key factors affecting the varying degrees of soil heavy metal pollution in different administrative regions, including the concentration of industrial enterprises, dense transportation arteries, and high population density. This study potentially provides a scientific basis and reference for the protection of the soil ecological environment in the core urban area.

Key words: soil heavy metals; urban park; transportation hub; environmental risk; Urumqi City